

# 盐碱胁迫下羊草植硅体的形态变化

耿云霞\* 李依玲 朱莎 朱精精 姜俊丞 牛洪昊 介冬梅\*\*

东北师范大学城市与环境科学学院, 长春 130024

**摘要** 对6个不同盐碱度梯度环境的羊草(*Leymus chinensis*)群落中生长状况良好的羊草进行人工筛选, 选取其中长势相近、叶片大小一致的羊草叶片, 用湿式灰化法提取植硅体并对其进行分类和命名, 共统计植硅体3 387粒, 鉴定出植硅体类型10类, 分别是平顶帽型、尖顶帽型、刺帽型、光滑棒型、刺棒型、似牛角棒型、尖型、板型、蜂窝状和其他类型。随着盐碱浓度的增加, 帽型、棒型、尖型、板型和蜂窝型都有不同程度的变化。帽型植硅体的百分含量都有不同程度的增加, 6组样品中同种形态植硅体的大小有一定差别, 植硅体的大小随着盐碱度的升高呈现出不同程度的变化, 总体上有增大的趋势。

**关键词** 羊草, 古环境, 植硅体, 盐碱胁迫, 松嫩草地

## Morphological changes of phytoliths in *Leymus chinensis* under saline-alkali stress

GENG Yun-Xia\*, LI Yi-Ling, ZHU Sha, ZHU Jing-Jing, JIANG Jun-Cheng, NIU Hong-Hao, and JIE Dong-Mei\*\*  
School of Urban and Environmental Sciences, Northeast Normal University, Changchun 130024, China

### Abstract

**Aims** Our objective is to study changes of phytoliths in *Leymus chinensis* quantitatively under saline-alkali stress to assist reconstruction of saline paleoenvironments.

**Methods** We selected similarly sized leaves of *L. chinensis* under six different saline-alkali levels and extracted phytoliths with the wet ashing method.

**Important findings** We identified and named 10 categories and 3 387 phytoliths: flat-topped rondel, peaked rondel, barbed rondel, smooth elongate, sinus elongate, horn-ends elongate, pointed, plate, favose and other types. With increased salt concentration, rondel, elongate, pointed, plate and favose changed. The percentage of rondel increased in all groups. The same type of phytolith had differences in morphology and percentage among groups. All types of phytoliths increased in size with saline-alkali stress.

**Key words** *Leymus chinensis*, paleoenvironment, phytolith, saline-alkali stress, Songnen Grassland

植物硅酸体, 简称植硅体, 是植物通过根系从土壤中吸收硅, 经维管束传送, 在细胞内腔或细胞之间形成的难溶的硅酸形态( $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) (王永吉和吕厚远, 1992)。20世纪80年代以后, 植硅体研究在我国起步并迅速发展起来。植硅体的命名及分类(王永吉和吕厚远, 1992; 吕厚远等, 2002; 李泉等, 2009)、植硅体分析作为一门新兴的边缘科学, 在考古学(姜钦华等, 1994; 张玉兰等, 2003; 秦颖等, 2008)、第四纪地质学(吴乃琴等, 1994; 刘宝柱等, 1995; 吕厚远等, 1996, 1999; 吉利明等, 2002; 王伟铭等, 2003)、医学(汤陵华等, 1999)、农学(姜钦华和张江凯, 1998)等研究领域被广泛地应用。

近年来, 由于生态问题突显, 植物生理生态学

因能够给许多生态环境问题以生理机制上的解释而日益受到广泛的重视。目前, 有关植物抗逆性生理生态学的研究有很多(宾淑英等, 1999; 王艳等, 2000; 熊曦等, 2001; 刘东焕等, 2002; 周婵等, 2002; 温达志等, 2003; 周婵和杨允菲, 2003; 胡小文等, 2004), 而以羊草(*Leymus chinensis*)为研究对象的内容大都集中在其盐碱胁迫的生理响应及其抗逆性研究上, 用到的指标一般有光合速率、光合色素含量、生长率、无机盐含量、可溶性蛋白质和糖含量等(颜宏等, 2000, 2006), 从植硅体的角度对不同盐碱环境羊草的研究很少见到。

植硅体作为重建古环境, 恢复古气候、古植被的代用指标(王永吉和吕厚远, 1992), 建立起现代植

物与其周围环境因子之间的关系, 以及不同植被下表土中植硅体类型与现代植被之间的关系显得尤为重要。羊草属于禾本科中早熟禾亚科, 具有一定的耐盐碱能力, 能够适应多种不良环境的胁迫, 是天然的优良牧草。在松嫩平原上广泛分布着以耐盐碱的羊草为主的草甸草原。本文通过人工选定松嫩草原上不同盐碱环境的羊草, 研究不同盐碱胁迫下羊草叶片中植硅体的形态大小变化, 为建立羊草叶片中植硅体与现代环境因子之间的关系, 并为运用植硅体作为古环境研究的代用指标提供一定的实验证明。本研究也从另一个角度来阐述羊草对盐碱环境的适应, 并可能为盐碱地的治理提供一个新思路。

## 1 研究区概况

研究地点位于吉林省长岭县腰井子种马场境内的东北师范大学草地生态研究站(123°45′–123°47′ E, 44°40′–44°50′ N), 地处松嫩平原南部, 由于地形封闭, 径流不畅, 地面蒸发量大, 地下水位高, 且含可溶性盐类, 该地区土壤大部分盐渍化。气候为温带半干旱季风气候, 是典型的大陆性气候。温差较大, 冬季寒冷, 夏季炎热。年平均气温4.9 °C, 年平均降水量470 mm, 集中在6–9月, 春季多风干旱, 年蒸发量为1 600 mm, 约为降水量的3.5倍。该地区处于由黑钙土向栗钙土的过渡带, 水平地带土壤为淡黑钙土, 洼地等地带有草甸土、盐土和碱土。该地区属草甸类型, 主要的植物群落有: 羊草群落、芦苇(*Phragmites communis*)群落、羊草+杂类草群落和拂子茅(*Calamagrostis epigeios*)群落等。羊草群落的产量占该地区整个草地生物量的80%–90%, 且分布广, 群落总盖度为80%以上。但是, 近些年来, 由于气候和地理位置及人为因素的作用, 群落所处地段的土壤出现了不同程度的盐碱化, 有的地方pH值已达10以上, 草地退化严重。

## 2 实验设计和方法

### 2.1 实验采样设计

在吉林省长岭县腰井子牧场北甸子上的东北师范大学野外试验站, 对6个不同盐碱浓度环境下的羊草群落中生长状况良好的羊草进行人工筛选, 选取其中长势相近、叶片大小一致的羊草叶片若干。6组样品分别按照样地盐碱环境的强弱, 按照盐碱不断增强给予1–6的编号。样地土壤情况参见表1。

在研究站采集羊草叶片的时间是10月中旬。

### 2.2 实验方法

羊草植硅体的提取采用湿式灰化法, 具体实验过程(王永吉和吕厚远, 1992; 介冬梅等, 2010)如下。

(1)清洗 用超声波清洗仪反复清洗羊草叶片, 并在恒温箱中烘干待用。

(2)氧化 取样品少量放入试管中, 向其中加入65%的浓硝酸适量(使羊草叶片中的有机质氧化彻底即可), 水浴加热试管, 加快氧化速度, 待试管中溶液变成淡黄色并且澄清透明, 则表明样品氧化完全。

(3)离心 样品冷却后, 倒掉试管中上部的液体再加蒸馏水, 在转速为2 000 r·min<sup>-1</sup>的离心机中离心20 min, 小心取出, 倒出试管上层清液, 重复上述步骤, 用蒸馏水离心清洗3次, 再加无水乙醇离心清洗1次, 最后留下试管底部的混浊物。

(4)制片 将离心后试管中剩余的液体用振荡器震荡均匀, 用一次性滴管吸取少量液体, 在载玻片上滴2–3滴, 等载玻片变干后, 滴上加拿大树胶, 盖上盖玻片, 制成永久玻片, 放在一侧晾干待用。

(5)鉴定、统计 采用Motic生物显微镜(麦克奥迪实业集团有限公司, 厦门)放大900倍, 统计鉴定每个样品的植硅体, 每个样品统计植硅体300粒以上。

## 3 实验结果和讨论

### 3.1 植硅体的类型

本文采用王永吉和吕厚远(1992)的禾本科植物分类系统对羊草植硅体进行分类和命名, 共统计植硅体3 387粒, 鉴定植硅体类型10类(因硅化细胞没有统计意义, 故硅化的气孔没有做统计): 平顶帽型、尖顶帽型、刺帽型、光滑棒型、刺棒型(齿形比较少, 故将其归于刺棒型中)、似牛角棒型、尖型、板型、蜂窝状和其他类型。图1展示了7种典型的羊草植硅体的光学显微照片。

前人对于羊草等早熟禾亚科植硅体的研究取得了很多的成果, 比较早的报道中认为早熟禾亚科植物中含有圆形、椭圆形、矩形等主要植硅体(Prat, 1936)。近藤鍊三和佐濑隆(1986)的研究把早熟禾亚科植硅体典型形态划分为船形、帽形、堆形、星形和齿形五类。棒形和尖形也较丰富, 但长方形或方形在早熟禾亚科植物中几乎没有, 扇型也见不到。王永吉和吕厚远(1992)将早熟禾亚科所特有的植硅

表1 6个不同盐碱样地对应的pH值和电导率(平均值±标准误差)

Table 1 pH and the electric conductivity of six different salinity samples (mean ± SE)

样地 Sampling site	1	2	3	4	5	6
pH	10.39 ± 0.3	10.39 ± 0.3	10.39 ± 0.3	10.42 ± 0.4	10.53 ± 0.3	10.52 ± 0.3
电导率 Electric conductivity (μs·cm <sup>-1</sup> )	7 850 ± 25	7 850 ± 30	6 100 ± 18	4 550 ± 15	2 850 ± 15	1 570 ± 10

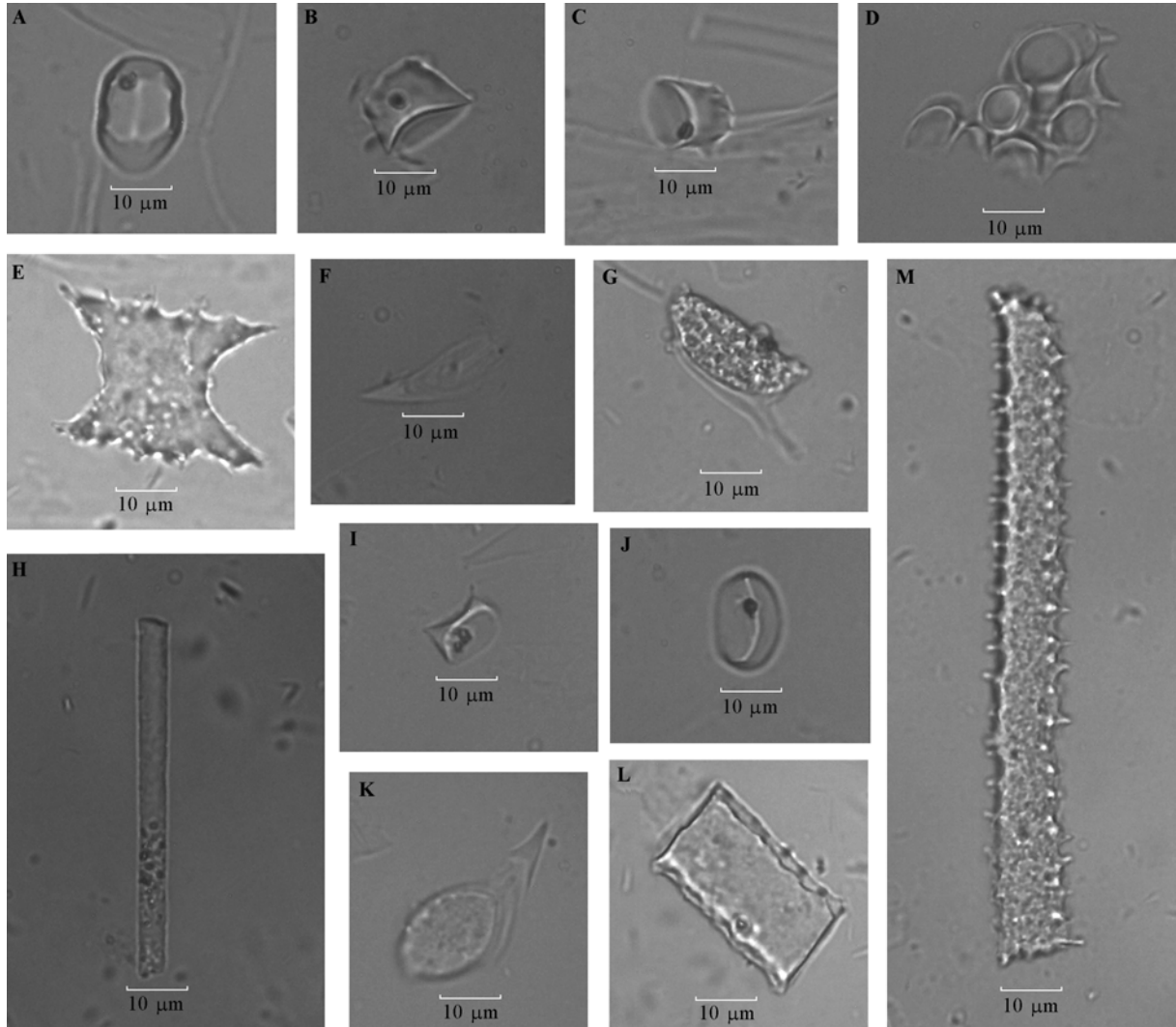


图1 实验中观察到的羊草植硅体。A, B, 平顶帽型。C, 刺帽型。D, 蜂窝型。E, 似牛角棒型。F, 无底座尖型。G, K, 有底座尖型。H, 光滑棒型。I, J, 尖顶帽型。L, 板型。M, 刺棒型。

Fig. 1 Microphotographs of phytolith observed. A, B, Rondel flat. C, Rondel echinate. D, Favose. E, Elongate horn-ends. F, Point no plateau. G, K, Point plateau. H, Elongate smooth. I, J, Rondel ridge. L, Tabular. M, Elongate echinate.

体分为11个类型: 两齿形、三齿形、多齿形、宽弱齿形、窄弱齿形、条状弱齿形、方齿形、平顶帽形、尖顶帽形、锥形和星形。

本实验中鉴定的植硅体的主要类型与前人分析的羊草植硅体中的主要类型基本相同, 与前人研究的禾本科植物中的植硅体组合基本相近。

### 3.2 不同植硅体含量

实验结果表明, 6个样品的羊草叶片中都含有大量的植硅体, 统计到的植硅体中, 帽型、棒型和尖型植硅体所占比例最高, 为90.1%, 是羊草中的典型植硅体形态。其他类型(包括板型、蜂窝型和其他类型的植硅体)所占比例较少, 可以称其为羊草

中的非典型植硅体。

研究发现, 帽型植硅体在早熟禾亚科的多数种中含量丰富, 尤其是在直穗鹅观草(*Roegneria turczaninovii*)、东瀛鹅观草(*Roegneria mayebarana*)、杂交鹅观草(*Roegneria hybrida*)和小麦(*Triticum aestivum*)中, 百分含量都达到了60%以上(王永吉和吕厚远, 1992)。黄翡和黄凤宝(2004)通过对内蒙古典型羊草草原的羊草的植硅体分析, 指出羊草中圆形植硅体(对应于本文中的帽型植硅体)占69.1%, 羊草表皮短细胞中齿形极少甚至缺乏。介冬梅等(2010)对松嫩平原不同生境羊草植硅体的研究和分析得到的结果是, 羊草的植硅体中帽形最多(不计入硅化的气孔), 百分含量高达56.8%, 还出现了刺帽型植硅体。

不同盐碱环境的羊草叶片中所含的主要植硅体类型相同, 但是在不同盐碱环境下的羊草叶片中, 同种形态的植硅体的百分含量有所不同, 植硅体的形态大小也有所变化。

从表1中可以看出, 随着盐碱浓度的增加, 帽型、棒型、尖型、板型和蜂窝型都有不同程度的变化。随着盐碱浓度的增加, 帽型植硅体的百分含量总体趋势是增加的, 尖顶帽型和帽型植硅体百分含量的变化曲线一致, 随生长环境盐碱度的增加, 从23.8%增加到29%, 再到33.3%, 之后开始减少到

29.7%, 又增加到37.1%, 最后又减少到35.8%; 而平顶帽型则是从样品1的29.6%增加到34.4%, 再到36.9%, 然后减少到35.8%, 继续减少到29.8%, 最后又增加到38.1%。棒型和蜂窝状植硅体的百分含量的变化曲线相似, 都呈“减少—增加—减少—增加”的近似“W”型的变化; 尖型和板型植硅体的百分含量呈“增加—减少—增加—减少”的近似“M”型变化。如图2、图3所示。

### 3.3 植硅体大小

在Motic生物显微镜放大900倍条件下, 本文观察并鉴定、统计了6组不同盐碱环境下羊草叶片的植硅体, 表3中列出了主要植硅体的描述参数大小。本次实验中, 植硅体的大小为1.9–178.4  $\mu\text{m}$ , 其中, 3种帽型植硅体的大小都在7.3–15.4  $\mu\text{m}$ 之间; 棒型植硅体的长度在48.5–106.8  $\mu\text{m}$ 之间, 宽度在5.0–14.3  $\mu\text{m}$ 之间; 尖型植硅体的宽度在7.2–12.4  $\mu\text{m}$ 之间, 高度在12.7–21.9  $\mu\text{m}$ 之间。帽型植硅体是早熟禾亚科非常典型又含量丰富的植硅体类型, 大小一般在10.0–20.0  $\mu\text{m}$ ; 禾本科植物中的尖型植硅体大小变化一般在10.0–200.0  $\mu\text{m}$ 之间, 宽20.0–50.0  $\mu\text{m}$  (王永吉和吕厚远, 1992)。本文中, 3种帽型植硅体比前人的统计相对较小; 棒型植硅体的长、宽和尖型植硅体的宽和前人的数据统计相似, 尖型植硅体的高比前人的统计结果要小, 也比较均匀。

表2 羊草叶片中植硅体类型百分含量(%)

Table 2 Percentage of types of phytolith in *Leymus chinensis* leaves (%)

类型 Type	1	2	3	4	5	6
帽型 Rondel	54.6	65.5	71.6	67.2	68.3	74.8
平顶帽型 Rondel flat	29.6	34.4	36.9	35.8	29.8	38.1
尖顶帽型 Rondel ridge	23.8	29.0	33.3	29.7	37.1	35.8
刺帽型 Rondel echinate	1.1	2.1	1.7	1.7	1.5	0.9
棒型 Elongate	18.3	7.3	10.2	10.3	6.5	9.1
光滑棒型 Elongate smooth	7.6	2.2	3.3	4.3	3.9	4.2
刺棒型 Elongate echinate	10.7	4.7	5.7	5.8	2.3	4.7
似牛角棒型 Elongate horn-ends	0.0	0.3	1.1	0.2	0.3	0.2
尖型 Point	13.6	19.6	9.0	11.0	14.3	8.4
板型 Tabular	1.8	1.6	1.1	0.4	1.5	1.6
蜂窝状 Favose	2.1	1.1	1.7	0.4	0.7	1.1
其他 Others	9.6	5.0	6.5	10.6	8.7	5.1
百分含量 Percentage	100	100	100	100	100	100
总数 Total	449	634	542	464	726	572

1, 2, 3, 4, 5, 6, 样地编号, 同表1。

1, 2, 3, 4, 5, 6, sample plot number, see Table 1.

表3 植硅体主要类型的形态大小

Table 3 Size of main types of phytolith

类型 Type	样品 Sample	$a$ ( $\mu\text{m}$ ) 平均值 $\pm$ 标准误差 Mean $\pm$ SD	值域 Range	$b$ ( $\mu\text{m}$ ) 平均值 $\pm$ 标准误差 Mean $\pm$ SD	值域 Range	$c$ ( $\mu\text{m}$ ) 平均值 $\pm$ 标准误差 Mean $\pm$ SD	值域 Range
帽型 Rondel							
平顶帽型 Rondel flat	1	14.7 $\pm$ 3.3	7.2–33.6	10.7 $\pm$ 3.3	2.7–24.8	7.2 $\pm$ 2.7	2.0–14.0
	2	14.6 $\pm$ 2.8	8.1–24.3	9.7 $\pm$ 2.9	3.6–18.0	6.3 $\pm$ 1.8	2.3–12.6
	3	14.5 $\pm$ 2.5	9.7–24.9	10.7 $\pm$ 3.0	3.0–20.2	7.3 $\pm$ 2.1	2.7–11.8
	4	14.9 $\pm$ 2.9	8.6–25.8	11.2 $\pm$ 3.1	3.3–22.9	7.4 $\pm$ 2.3	3.2–13.1
	5	13.7 $\pm$ 2.9	9.5–24.5	10.1 $\pm$ 2.8	4.8–18.3	6.7 $\pm$ 2.4	1.9–13.8
	6	12.8 $\pm$ 2.7	8.1–25.4	10.1 $\pm$ 2.6	4.2–21.7	6.3 $\pm$ 2.2	2.2–13.3
尖顶帽型 Rondel ridge	1	12.8 $\pm$ 2.3	8.3–19.9	9.9 $\pm$ 2.3	4.0–16.9	8.2 $\pm$ 2.3	1.9–13.9
	2	11.8 $\pm$ 1.0	8.5–18.1	9.3 $\pm$ 1.7	4.5–14.5	8.5 $\pm$ 2.1	4.2–14.2
	3	14.2 $\pm$ 2.2	9.2–21.3	11.0 $\pm$ 2.2	3.5–17.7	8.9 $\pm$ 1.8	5.3–13.7
	4	13.8 $\pm$ 2.5	8.5–24.4	10.7 $\pm$ 2.3	3.7–18.0	7.5 $\pm$ 2.4	4.5–14.2
	5	12.2 $\pm$ 2.2	7.4–26.5	9.7 $\pm$ 2.5	3.8–26.6	7.7 $\pm$ 1.9	2.7–12.4
	6	11.9 $\pm$ 2.1	8.6–19.9	10.2 $\pm$ 2.3	4.5–16.7	8.4 $\pm$ 2.3	3.2–14.8
刺帽型 Rondel echinate	1	13.8 $\pm$ 2.3	12.5–17.5	7.6 $\pm$ 1.2	5.6–7.8		
	2	14.1 $\pm$ 2.6	9.8–18.2	7.3 $\pm$ 0.9	5.4–9.2		
	3	15.4 $\pm$ 2.7	11–19.9	9.4 $\pm$ 1.7	8.3–13.4		
	4	15.4 $\pm$ 3.4	6–16.4	8.2 $\pm$ 2.2	5.4–10.9		
	5	14.4 $\pm$ 5.2	9.1–26.5	7.4 $\pm$ 2.1	4.6–12.0		
	6	12.7 $\pm$ 3.5	9.2–18.4	9.5 $\pm$ 4.1	6.3–15.3		
棒型 Elongate							
光滑棒型 Elongate smooth	1	51.1 $\pm$ 24.6	15.7–96.4	7.5 $\pm$ 3.3	4.5–16.2		
	2	60.4 $\pm$ 30.9	28.8–120.6	9.4 $\pm$ 5.6	6.1–23.0		
	3	82.8 $\pm$ 45.7	22.3–178.4	10.4 $\pm$ 5.4	4.7–19.6		
	4	70.2 $\pm$ 24.3	26.6–98.9	10.5 $\pm$ 6.1	3.5–23.1		
	5	34.9 $\pm$ 36.9	9.6–165.6	5.0 $\pm$ 4.5	2.9–20.7		
	6	98.3 $\pm$ 46.6	35.2–175.8	7.0 $\pm$ 5.6	3.2–25.1		
刺棒型 Elongate echinate	1	50.7 $\pm$ 17.2	28.8–87.0	12.0 $\pm$ 3.5	4.6–19.2		
	2	75.7 $\pm$ 28.9	50.7–129.0	13.6 $\pm$ 3.4	8.7–18.6		
	3	86.2 $\pm$ 35.1	42.6–119.8	10.7 $\pm$ 4.2	4.8–24.3		
	4	48.5 $\pm$ 38.8	28.9–170.7	10.1 $\pm$ 5.1	4.5–22.0		
	5	72.5 $\pm$ 38.3	30.0–152.0	14.3 $\pm$ 4.3	10.3–27.8		
	6	106.8 $\pm$ 33.2	42.4–156.1	9.8 $\pm$ 7.6	4.9–14.2		
尖型 Point	1	16.5 $\pm$ 14.2	6.0–79.1	10.0 $\pm$ 4.5	4.3–23.1		
	2	20.1 $\pm$ 13.8	6.3–62.7	11.4 $\pm$ 7.5	3.6–55.8		
	3	21.9 $\pm$ 11.7	7.5–61.1	12.4 $\pm$ 4.4	4.5–23.7		
	4	17.9 $\pm$ 11.5	7.5–60.7	9.4 $\pm$ 5.3	3.9–27.8		
	5	12.7 $\pm$ 7.3	4.2–52.47	7.2 $\pm$ 4.6	3.0–39.2		
	6	20.5 $\pm$ 9.6	9.2–48.9	11.2 $\pm$ 6.6	5.4–36.5		
板型 Tabular	1	24.0 $\pm$ 14.7	12.6–53.7	13.2 $\pm$ 5.3	8.0–25.2		
	2	21.2 $\pm$ 7.0	10.5–35.7	11.2 $\pm$ 6.4	7.6–24.8		
	3	27.5 $\pm$ 23.0	14.6–78.3	15.8 $\pm$ 7.7	10.4–30.5		
	4	23.9 $\pm$ 5.2	20.2–27.6	13.2 $\pm$ 0.4	12.9–13.5		
	5	21.3 $\pm$ 10.6	13.6–45.9	13.1 $\pm$ 5.1	7.4–24.8		
	6	21.9 $\pm$ 11.3	14.0–44.3	15.1 $\pm$ 7.3	8.6–32.6		
蜂窝 Favose	1	26.6 $\pm$ 6.7	18.8–36.5	17.0 $\pm$ 6.4	13.3–27.9		
	2	33.6 $\pm$ 7.5	31.0–45.1	23.5 $\pm$ 3.6	21.3–28.3		
	3	31.7 $\pm$ 23.4	20.6–72.0	20.0 $\pm$ 4.0	14.6–23.5		
	4	29.3 $\pm$ 4.5	26.1–32.4	23.0 $\pm$ 1.2	22.1–23.8		
	5	32.3 $\pm$ 4.3	26.1–32.4	23.6 $\pm$ 3.4	16.3–24.7		
	6	45.8 $\pm$ 8.1	37.5–60.3	28.0 $\pm$ 8.9	25.3–45.2		

植硅体统计参数: 对于光滑棒型、刺棒型、板型、蜂窝型,  $a$ 代表长度,  $b$ 代表宽度; 对于平顶帽型,  $a$ 代表下底的长,  $b$ 代表上底的长,  $c$ 代表高; 对尖顶帽型,  $a$ 代表下底的长,  $b$ 代表脊长,  $c$ 代表下底的宽; 对于尖形,  $a$ 代表底座的长,  $b$ 代表高; 对刺帽型,  $a$ 代表下底的长,  $b$ 代表高。

Statistical parameters of phytolith: For elongate smooth, rondel echinate, tabular and favose,  $a$  is for length,  $b$  is for width. For rondel flat,  $a$  is for the length of its top,  $b$  is for the length of bottom, and  $c$  is for the height. For rondel ridge,  $a$  is for the length of its underside,  $b$  is for the length of its ridge,  $c$  is for the width of its underside. For point,  $a$  is for the length, and  $b$  is for the height. For rondel echinate,  $a$  is for the length of its underside, and  $b$  is for the height.

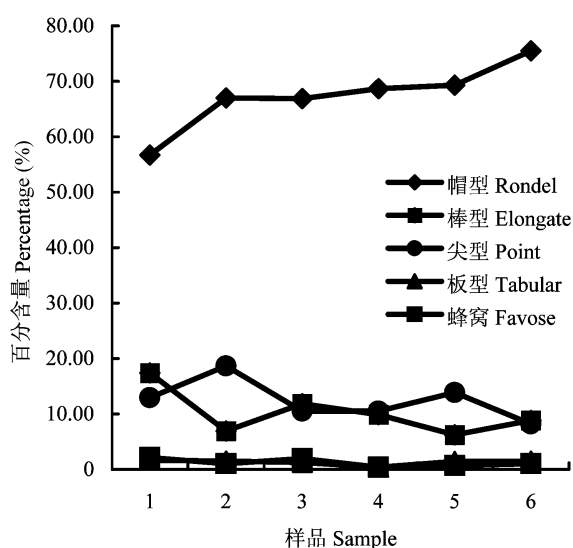


图2 5种主要植硅体百分含量的变化。1, 2, 3, 4, 5, 6, 样地编号, 同表1。

Fig. 2 Variation of percentage of five main types of phytolith. 1, 2, 3, 4, 5, 6, sample plot number, see Table 1.

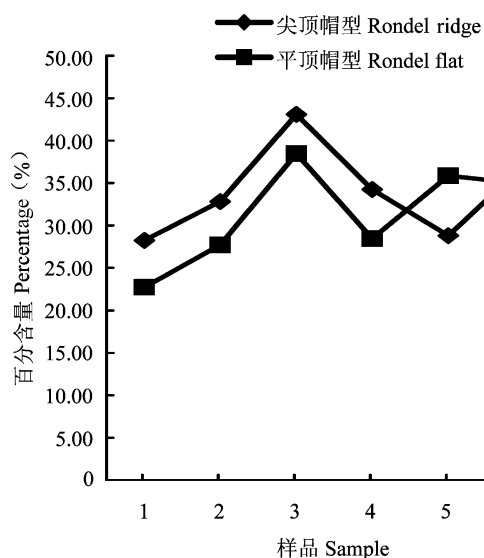


图3 两种帽型植硅体百分含量的变化。1, 2, 3, 4, 5, 6, 样地编号, 同表1。

Fig. 3 Variation of percentage of two types of rondel phytolith. 1, 2, 3, 4, 5, 6, sample plot number, see Table 1.

6组样品中同种形态的植硅体的大小有一定的差别, 植硅体的大小随着盐碱度的升高都呈现出不同程度的变化, 总体上都有增大的趋势(表3)。3种帽型的植硅体先增大, 在样品3或4达到最大值后变小, 而棒型、尖型、板型和蜂窝状植硅体则是先增大, 到样品3或4到达一个峰值后减小, 最后又在样品6达到各组的最大值。

#### 4 结论

羊草叶片中的植硅体形态多样, 数量丰富, 其中帽型植硅体含量最多。羊草植硅体的大小为1.9–178.4 μm。不同类型植硅体的含量以及植硅体的大小都随着盐碱浓度不断增大有不同的变化趋势。

在前人的研究中, 随着生长环境盐碱浓度增加, 植物自身都会发生一定的生理变化来适应这种变化, 例如: 通过改变细胞膜的通透性来大量吸收土壤中的无机离子、植物体内分泌渗透调节物质——脯氨酸、一些糖类、小分子有机化合物和蛋白质类保护剂的调节等(王萍等, 1994; 林栖凤和李冠一, 2000; 张楠楠和徐香玲, 2005), 来调节、维持渗透平衡和保持水分。无论植物通过哪些生理变化来适应外界的盐碱环境变化, 最终目的都是维持植物体内渗透压和水分的平衡, 进而保证或尽量维持植物正常的生长, 这势必影响或改变植物细胞的形态和大小。而植硅体是发育在植物细胞中或细胞间空隙的一种非晶质硅, 所以, 羊草生境中盐碱度的变化会导致羊草叶片中植硅体形态、大小的变化。

通过研究, 羊草叶片中植硅体的百分含量及形态大小都与盐碱的生长环境有关, 也就是说, 在一定程度上, 植硅体百分含量、形态大小的变化能反映其来源植物的生长环境变化, 从而为恢复古环境提供一种新的参考指标。

**致谢** 国家自然科学基金(40971116)、国家大学生创新实验计划项目(091020046)和环保公益项目(201109067)资助。

#### 参考文献

Bin SY (宾淑英), Yao SM (姚圣梅), Lin JT (林进添), Feng ZX (冯志新) (1999). Some physiological changes of peanut plants infected with *Meloidogyne arenaria*. *Journal of Huazhong Agricultural University* (华中农业大学学报), 18, 121–124. (in Chinese with English abstract)

Hu XW (胡小文), Wang YR (王彦荣), Wu YP (武艳培) (2004). Research progress on eco-physiological responses of desert grassland plants to drought conditions. *Acta Prataculturae Sinica* (草业学报), 13(3), 9–15. (in Chinese with English abstract)

Huang F (黄翡), Lisa K, Huang FB (黄凤宝) (2004). Diagnostic phytoliths from Nei Mongol grassland. *Acta Palaeontologica Sinica* (古生物学报), 43, 246–253. (in Chinese

- with English abstract)
- Ji LM (吉利明), Chen JF (陈践发), Lai XL (赖旭龙), Wang J (王杰) (2002). Application of phytolith in reconstruction of loessial paleoclimate. *Geology-Geochemistry* (地质地球化学), 30, 58–62. (in Chinese with English abstract)
- Jiang QH (姜钦华), Liu JB (刘建波), Wang WH (王文华), (1994). A palynomorph and phytolith study of a Neolithic site in Yingyang, Dengfeng County, Henan Province and its implications. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinesis* (北京大学学报(自然科学版)), 30, 453–460. (in Chinese with English abstract)
- Jiang XH (姜钦华), Zhang JK (张江凯) (1998). Phytolith evidence for rice cultivation during prehistoric periods at Baligang site of Baizhuang, Dengzhou City, Henan Province. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis* (北京大学学报), 34, 66–71. (in Chinese with English abstract)
- Jie DM (介冬梅), Liu ZY (刘朝阳), Shi LX (石连旋), Liu HM (刘红梅), Ge Y (葛勇) (2010). Characteristics of phytoliths in *Leymus chinensis* from different habitats on the Songnen Plain in Northeast China and their environmental implications. *Science in China* (中国科学), 40, 493–502. (in Chinese)
- Kondo R (近藤鎌三), Sase T (佐瀬隆) (1986). Opal phytoliths, their nature and application. *Quaternary Science* (第四纪研究), 25, 31–63. (in Japanese with English summary)
- Li Q (李泉), Lü HY (吕厚远), Wang WM (王伟铭) (2009). Introduction and discussion on international code for Phytolith Nomenclature 1.0. *Acta Palaeontologica Sinica* (古生物学报), 48, 131–138. (in Chinese with English abstract)
- Lin QF (林栖凤), Li GY (李冠一) (2000). Research progress in salt tolerance in plants. *Progress in Biotechnology* (生物工程进展), 20, 20–25. (in Chinese with English abstract)
- Liu BZ (刘宝柱), Li CX (李从先), Ye ZZ (业治铮) (1995). Phytolith and its paleoenvironmental significance in the studies of late quaternary paleosols in the Yangtze delta area. *Quaternary Science* (第四纪研究), 15, 15–24. (in Chinese with English abstract)
- Liu DH (刘东焕), Zhao SW (赵世伟), Gao RF (高荣孚), Zhang ZS (张佐双), Jiang CD (姜闯道), Liu YJ (刘玉军) (2002). Response of plants photosynthesis to higher temperature. *Bulletin of Botanical Research* (植物研究), 22, 205–210. (in Chinese with English abstract)
- Lü HY (吕厚远), Jia JW (贾继伟), Wang WM (王伟铭), Wang YJ (王永吉), Liao GB (廖淦标) (2002). On the meaning of phytolith and its classification in Gramineae. *Acta Micropalaeontologica Sinica* (微体古生物学报), 19, 389–396. (in Chinese with English abstract)
- Lü HY (吕厚远), Liu DS (刘东生), Wu NQ (吴乃琴), Han JM (韩家懋), Guo ZT (郭正堂) (1999). Phytolith record of vegetation succession in the Southern Loess Plateau since late pleistocene. *Quaternary Science* (第四纪研究), 19, 336–349. (in Chinese with English abstract)
- Lü HY (吕厚远), Wu NQ (吴乃琴), Liu DS (刘东生), Han JM (韩家懋), Qin XG (秦小光), Sun XJ (孙湘君), Wang YJ (王永吉) (1996). Seasonal climatic variation recorded by phytolith assemblages from the Baoji loess sequence in central China over the last 150 000 a. *Science in China (Series D)* (中国科学D辑), 26, 131–136. (in Chinese)
- Prat H (1936). La systematique des Graminees. *Annales des Sciences, Naturelles, Botanique, Series 2*. 18, 165–258.
- Qin Y (秦颖), Yao ZG (姚政权), Wei GF (魏国锋), Hu YL (胡雅丽), Wang CS (王昌燧) (2008). Determining the foundry area of bronze vessels from Jiuliandun tombs based on phytolith analysis of casting core residue. *Journal of University of Science and Technology of China* (中国科学技术大学学报), 38, 326–330. (in Chinese with English abstract)
- Tang LH (汤陵华), Sato YI (佐藤洋一郎), Udatsu TT (宇田津彻朗), Sun JX (孙加祥) (1999). Types of the ancient rice subspecies cultivated in Caoxie Hill vestige of China. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences* (江苏农业学报), 15, 193–197. (in Chinese with English abstract)
- Wang P (王萍), Yin LJ (殷立娟), Li JD (李建东) (1994). Studies on the adaptability and tolerance of *Leymus chinensis* to salinity in salinized grassland in the Songnen Plain. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 14, 306–311. (in Chinese with English abstract)
- Wang WM (王伟铭), Liu JL (刘金陵), Zhou XD (周晓丹) (2003). Climate indexes of phytoliths from Homo erectus' cave deposits in Nanjing. *Chinese Science Bulletin* (科学通报), 48, 1205–1208. (in Chinese)
- Wang Y (王艳), Li XL (李晓林), Zhang FS (张福锁) (2000). Current research on suitable mechanisms on different plant genotypes under phosphorous stress condition. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (生态农业研究), 8, 34–36. (in Chinese with English abstract)
- Wang YJ (王永吉), Lü HY (吕厚远) (1992). *Phytolith Study and Its Application* (植物硅酸体研究及应用). Ocean Press, Beijing. (in Chinese)
- Wen DZ (温达志), Kong GH (孔国辉), Zhang DQ (张德强),

- Peng CL (彭长连), Zhang RF (张瑞凤), Li X (黎旭) (2003). Ecophysiological responses of 30 gardens plant species exposed to short-term air pollution. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 27, 311–317. (in Chinese with English abstract)
- Wu NQ (吴乃琴), Lü HY (吕厚远), Sun XJ (孙湘君), Guo ZT (郭正堂), Liu JQ (刘嘉麒), Han JM (韩家懋) (1994). Phytolith-climate transfer functions at Weinan since the late glacial environmental studies of the ancient. *Quaternary Science* (第四纪研究), 14, 270–277. (in Chinese)
- Xiong X (熊曦), Wu YQ (吴彦奇), Li X (李西) (2001). Progress of physiological and biochemical research on bermudagrass related to cold tolerance. *Pratacultural Science* (草业科学), 18, 39–45. (in Chinese with English abstract)
- Yan H (颜宏), Shi DC (石德成), Yin SJ (尹尚军), Zhao W (赵伟) (2000). Effects of saline-alkaline stress on the contents of nitrogen and several organisms of *Aneurolepidium chinense*. *Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition)* (东北师范大学学报(自然科学版)), 32(3), 47–52. (in Chinese with English abstract)
- Yan H (颜宏), Zhao W (赵伟), Yin SJ (尹尚军), Shi DC (石德成), Zhou DW (周道玮) (2006). Different physiological responses of *Aneurolepidium chinense* to NaCl and Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. *Acta Pratacultural Sinica* (草业学报), 15, 49–55. (in Chinese with English abstract)
- Zhang NN (张楠楠), Xu XL (徐香玲) (2005). The study of the mechanism which the plants resist the salt. *Natural Science Journal of Harbin Normal University* (哈尔滨师范大学(自然科学学报)), 21, 65–68. (in Chinese with English abstract)
- Zhang YL (张玉兰), Zhang MB (张敏斌), Song J (宋建) (2003). Development of ancestors' cultivation revealed in phytolith assemblages from Guangfulin relics. *Chinese Science Bulletin* (科学通报), 48, 287–290. (in Chinese)
- Zhou C (周婵), Yang YF (杨允菲), Li JD (李建东) (2002). Physiological response of two divergent *Leymus chinensis* types to drought stress in the Songnen Plain. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 13, 1109–1112. (in Chinese with English abstract)
- Zhou C (周婵), Yang YF (杨允菲) (2003). Physiological response to salt-alkali stress in experimental populations in two ecotypes of *Leymus chinensis* in the Songnen Plains of China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 14, 1842–1846. (in Chinese with English abstract)

责任编辑: 蒋高明 责任编辑: 李 敏